

بررسی و پهنه بندی نقشه خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز ليقوان چای با استفاده از مدل ANP

موسی عابدینی*^۱، سودا قبادی علمدار^۲، بهاره قاسمیان^۳

۱. استاد، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

Abedini@uma.ac.ir

۲. کارشناس ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

۳. دانش آموخته دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۸

چکیده

در این پژوهش به ارزیابی مکانی خطر وقوع زمین لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای پرداخته شد. حوضه آبخیز ليقوان چای با مساحتی در حدود ۲۰۰ کیلومترمربع در محدوده سیاسی - اداری شهرستان تبریز واقع شده است. به منظور پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای از ۹ متغیر مکانی بهره گرفته شد. برای تعیین وزن هر یک از متغیرها از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده به عمل آمد. توجه هم‌زمان به روابط درونی و بیرونی بین معیارها مهم‌ترین مزیت مدل ANP نسبت به سایر مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. نتایج حاصل از مدل ANP نشان می‌دهد که سه متغیر شیب (با وزن ۰/۲۷۹)، سازندهای زمین‌شناسی (با وزن ۰/۲۲۴) و بارش (با وزن ۰/۱۶۵) موثرترین متغیرهای دخیل در رخداد زمین لغزش در مقیاس حوضه آبخیز ليقوان چای می‌باشند. در واقع، این متغیرها با فراهم نمودن شرایط مستعد، وقوع زمین لغزش‌های منطقه را کنترل می‌کنند. همچنین، پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش از طریق روی هم‌گذاری معیارهای تحقیق با استفاده از ضرایب حاصل از مدل ANP در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نشان داد که در حدود ۳۶ درصد از سطح حوضه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. بخش اعظمی از این پهنه‌ها در یالادست حوضه واقع شده‌اند. مشارکت هم‌زمان چندین عامل از قبیل شیب زیاد، بارش بالا، سازندهای زمین‌شناسی حساس، وجود گسله‌ها و غیره باعث شده است که قسمت‌های بالادست حوضه ليقوان چای از شرایط مناسبی برای وقوع زمین لغزش برخوردار شوند.

کلید واژه‌ها: زمین لغزش، مدل ANP، GIS، ليقوان چای.

مقدمه

زمین لغزش‌ها، پدیده‌هایی خطرناک و فاجعه‌بار به‌شمار می‌روند (Haque et al., 2019). که هر ساله اثرات زیادی از جمله خسارت‌های اقتصادی، تخریب زیرساخت‌ها و شکست زیست محیطی بر جوامع بشری وارد می‌کند (Chen et al., 2017). عوامل مختلفی بر وقوع این پدیده تأثیر دارند که در این میان می‌توان به شدت و مدت بارندگی، پراکنش فضایی پوشش گیاهی، توپوگرافی، شرایط خاک، واحدهای زمین‌شناختی، هیدرولوژی و فعالیت‌های انسان اشاره کرد (Aghdam et al., 2017). مطالعات درمورد زمین لغزش بیانگر این است که زمین لغزش مخاطره‌ای است که اغلب به فراوانی روی می‌دهد و در همه قاره‌ها وجود دارد و برای انسان‌ها، زیرساخت‌ها و محیط زیست تهدید جهانی است در این خصوص تولید نقشه‌های دقیق منطقه بندی حساسیت به زمین لغزش از موضوعات مهم برای مطالعات مدیریت خطر است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۲؛ Broeckx et al., 2016). در دهه‌های اخیر با توجه به روند افزایشی خسارت‌های ناشی از سوانح طبیعی، بالاخص زمین‌لغزش، مقوله پیش‌بینی و جلوگیری از خسارت‌های وارده به طور جدی مطرح گردیده است (ایزدی و انتظاری، ۱۳۹۲). تاکنون مطالعات زیادی در خصوص پهنه بندی خطر زمین لغزش با استفاده مدل‌های مختلف و روش ANP در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است برای مثال، Anbalagan و همکاران (۲۰۱۵)، به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در دره لاجونگ^۱ هیمالیا با استفاده از نسبت فراوانی و منطق فازی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که زاویه شیب بالا (بین ۳۵ تا ۴۵ درجه)، طبقات با درجه ناهمواری نسبی بالا، جهت‌های جنوبی، جنوب شرقی و جنوب غربی، فاصله بین ۰ تا ۱۵۰ متری از آبراهه‌ها، لیتولوژی مرتبط با شیست‌ها، خاک‌های لومی، اراضی آیش و پوشش گیاهی پراکنده زمین لغزش‌های منطقه را در کنترل خود دارند. Abedini و همکاران (۲۰۱۷) پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش در شهرستان بیجار کردستان را با استفاده از رگرسیون لجستیک و مدل AHP مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مدل AHP نشان داد که ۳/۴ درصد از منطقه دارای حساسیت بسیار کم، ۳۰/۴۳ درصد حساسیت کم، ۴۶/۶۸ درصد حساسیت متوسط، ۱۸/۱۴ درصد حساسیت بالا و ۱/۳۳ درصد حساسیت بسیار بالا بوده است. در پژوهشی دیگر Abedini و همکاران (۲۰۱۸) پهنه بندی خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز نوزیان استان لرستان را با استفاده از سه مدل LNRFR، FR و AHP مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که مدل LNRFR با ۴۰ درصد، FR با ۳۹ درصد و مدل AHP با ۴۴ درصد در کلاس‌های خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار دارند. Zhang و همکاران (۲۰۲۲) ارزیابی خطر زمین لغزش در منطقه یاننان چین را با استفاده از رویکرد ترکیبی بر اساس InSAR و جنگل تصادفی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که نتایج نشان می‌دهد که تنها ۲۶ درصد از واحدهای شیب در سطوح بسیار بالا و پرخطر برای زمین لغزش قرار داشته و این واحدها عمدتاً در مراکز شهری متمرکز شده‌اند. این گونه مناطق خطر باید جدی گرفته شود و پویایی آنها باید پایش شود. Asmare (۲۰۲۳) به منظور بررسی کاربرد و اعتبار سنجی روش‌های AHP و FR برای تهیه نقشه حساسیت زمین لغزش در اطراف کوه چوک، شمال غربی اتیوپی پرداختند. نتایج ایشان با استفاده از روش مساحت زیر منحنی (AUC) مقایسه و اعتبارسنجی شد و نشان داد که بر اساس نمودار AUC، روش‌های AHP و FR به ترتیب دارای میزان موفقیت ۸۵.۸ و ۸۲.۰ درصد و

^۱- Lachung

نرخ پیش بینی ۸۸.۲ و ۸۴.۸ درصد بودند. با توجه به نتایج اعتبارسنجی AUC، نقشه به دست آمده از روش AHP دقیق تر از نقشه به دست آمده از روش FR است. Zhou و همکاران (۲۰۲۳) ارزیابی حساسیت زمین لغزش را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در شهرستان یونشیان، جنوب غربی چین مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از ارزیابی ایشان نشان داد که منحنی ROC برای آزمایش نتایج ارزیابی پارتیشن اتخاذ شد و مقدار AUC 0.845 تعیین شد که نشان دهنده دقت بالای نتایج ارزیابی پارتیشن است. Addis (۲۰۲۳) پهنه بندی نقشه حساسیت زمین لغزش را با استفاده از GIS و نسبت فرکانس و مدل‌های آنتروپی شانون در منطقه Dejen، شمال غربی اتیوپی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مدل‌های دقت AUC نشان داد که میزان موفقیت مدل‌های FR و SE به ترتیب ۰/۷۶۱ و ۰/۸۲۲ بود، در حالی که نرخ‌های پیش‌بینی به ترتیب ۰/۷۵۳ و ۰/۸۲۶ بود. در پژوهشی دیگر گوپیناس و همکاران (۲۰۲۳) مجموعه‌ای از فرآیند سلسله مراتبی تحلیلی فازی در مدل سازی حساسیت زمین لغزش را در منطقه جنوب هند را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که حدود ۲۷ درصد از منطقه مورد مطالعه به عنوان مناطق بسیار حساس و پس از آن ۲۴ درصد منطقه در ناحیه نسبتاً حساس، ۳۳ درصد در ناحیه کم حساس و ۱۶ درصد در منطقه حساس بسیار کم طبقه بندی می‌شوند. همچنین، این مطالعه نشان می‌دهد که اسکارپ‌های فلات در گات‌های غربی به شدت در معرض وقوع زمین لغزش هستند. علاوه بر این، دقت پیش‌بینی شده توسط نمرات AUC (۷۹ درصد) و امتیازات FI (۸۵ درصد) نشان می‌دهد که نقشه LSM برای کاهش خطرات آینده و برنامه‌ریزی کاربری زمین در منطقه مورد مطالعه قابل اعتماد است. در ایران نیز عابدینی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی خطر زمین لغزش در پهنه گسلی قوشاداغ-ارسباران را با استفاده از مدل‌های ANP و LR مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بدین منظور ۱۴ فاکتور مؤثر در وقوع زمین لغزش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که در وقوع زمین لغزش‌ها، عامل فاصله از گسل و بارش بیشترین و کاربری زمین کمترین نقش را داشته‌اند. جعفری و همکاران (۱۳۹۸)، با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) به پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه آبریز بدرانلو پرداختند. بر اساس این پژوهش، مهمترین فاکتورهای موثر بر رخداد زمین لغزش‌های حوضه مطالعاتی شیب دامنه، لیتولوژی، فاصله از رودخانه و بارندگی سالانه می‌باشند. جمال آبادی و همکاران (۱۳۹۹)، به منظور شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در دهستان ژاورود براساس مدل تلفیقی فازی و فرایند تحلیل شبکه (ANP) پرداختند. نتایج نشان داد منطقه از نظر پتانسیل لغزش در ۴ رده طبقه‌بندی و میزان لغزش‌پذیری منطقه از خیلی زیاد (۷/۵ درصد)، زیاد (۲۷ درصد)، متوسط (۳۱ درصد) و کم (۳۴/۵ درصد) متغیر است. کیانی و همکاران (۱۴۰۰)، به منظور پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک و آنفیس در حوضه آبریز هشتمین استان اردبیل پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که دقت مدل آنفیس و رگرسیون لجستیک به ترتیب برابر ۸۸/۲۳٪ و ۸۶/۴۵٪ بوده است. همچنین نتایج براساس مدل آنفیس بیانگر آن است که حدود ۴۸۵۴ هکتار، معادل ۲۰/۶٪ از منطقه هشتمین از نظر مخاطره زمین لغزش در کلاسه زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. کنعانی (۱۴۰۲) شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز سد ایلام را با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای مورد مطالعه قرار داد. نتایج ایشان نشان داد که بخش‌های مرکزی و غربی منطقه پتانسیل بالایی از نظر وقوع زمین لغزش دارند. درواقع، این مناطق به دلیل نزدیکی به خطوط گسلی، رودخانه و جاده اصلی، نوع کاربری و شیب زیاد، مستعد وقوع زمین لغزش

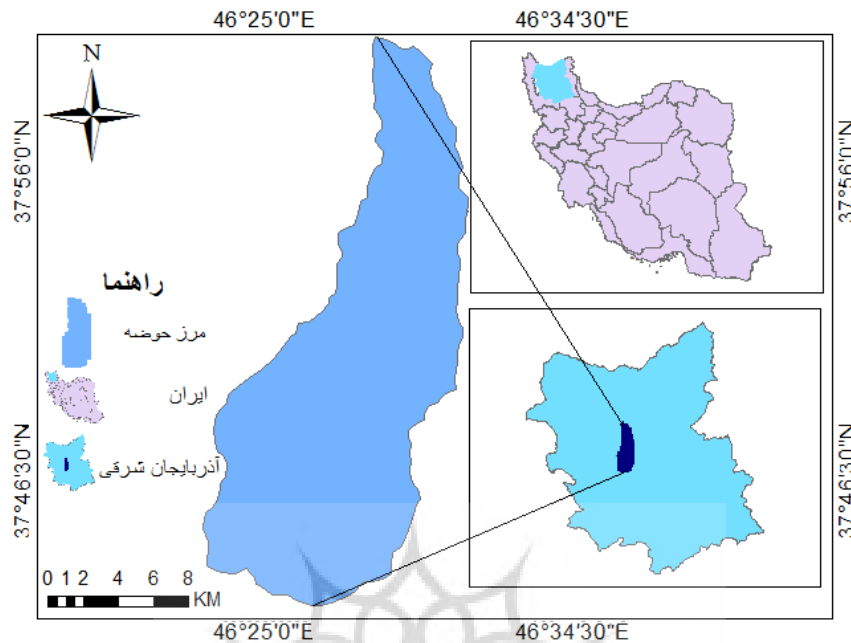
هستند. همچنین بخش‌های شرقی منطقه به دلیل نوع کاربری، دور بودن از خطوط گسلی، دور بودن از جاده و رودخانه، پتانسیل کمی جهت وقوع زمین لغزش دارند. عابدینی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه نیرچای با استفاده از مدل ANP پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که سه متغیر شیب (با وزن ۰/۲۱۷)، لیتولوژی (با وزن ۰/۲۱۷) و بارش (با وزن ۰/۱۶۷) از بیشترین میزان اهمیت برخوردار بوده و در واقع، کنترل‌کننده‌های اصلی فرایند زمین لغزش در سطح حوضه آبریز نیرچای به شمار می‌روند. نتایج پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش نیز حاکی از این است که حدود ۹/۸ درصد از سطح حوضه نیرچای در کلاس خطر بسیار زیاد و در حدود ۱۹/۳ درصد آن نیز در کلاس خطر زیاد قرار می‌گیرد. پهنه‌های بسیار پرخطر و پرخطر عمدتاً در قسمت‌های میانی حوضه نیرچای پراکنده شده‌اند. در پژوهش حاضر، حوضه آبخیز لیقوان‌چای از نظر خطر وقوع زمین لغزش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطره زمین لغزش، برآورد میزان اهمیت یا اثرگذاری هر یک از این فاکتورها ضروری می‌باشد. بدین منظور، در این پژوهش از مدل فرایند تحلیل شبکه (ANP) در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به منظور ارزیابی مکانی متغیرهای موثر بر رخداد زمین لغزش و استخراج وزن یا میزان اثرگذاری هر یک از متغیرها در رخداد زمین لغزش استفاده به عمل آمد. مدل ANP با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و نواقص تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) توسط ال ساعتی در سال ۱۹۹۶ بنیان نهاده شد. در واقع، مدل مذکور اصلاح یافته روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به شمار می‌رود و از تمامی ویژگی‌های مثبت AHP، از جمله سادگی، انعطاف‌پذیری، کاربست هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی و توانایی ارزیابی سازگاری و قضاوت‌ها برخوردار می‌باشد و علاوه بر آن قادر است ارتباطات پیچیده (وابستگی‌های متقابل و بازخورد) بین عناصر تصمیم را با استفاده از ساختار شبکه‌ای به جای ساختار سلسله‌مراتبی مورد توجه قرار دهد (زبردست، ۱۳۸۹). حوضه آبخیز لیقوان‌چای از جمله حوضه‌هایی به شمار می‌رود که از پتانسیل بالایی جهت وقوع زمین لغزش برخوردار می‌باشد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی و پهنه‌بندی نقشه خطر وقوع زمین لغزش در حوضه آبخیز لیقوان‌چای با استفاده از مدل ANP می‌باشد. بدین ترتیب با پهنه‌بندی مخاطره زمین لغزش در سطح حوضه مطالعاتی می‌توان مناطق خطرناک و مستعد زمین لغزش را شناسایی نمود و نسبت به کنترل کاربری اراضی و اقدامات مدیریتی در جهت کاهش احتمال وقوع این مخاطره اقدام نمود.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

لیقوان‌چای از حوضه‌های شعاعی و واگرای دامنه شمالی توده آتشفشانی سهند به شمار می‌رود. این حوضه در مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). حوضه آبخیز لیقوان‌چای با مساحتی در حدود ۲۰۰ کیلومترمربع دارای شکلی کشیده و طولیل و جهت‌گیری جنوبی-شمالی می‌باشد. رودخانه لیقوان‌چای آبراه اصلی این حوضه به شمار می‌رود که در بالادست با نام باغچا دره‌سی‌چای، از نقاط و قله مرتفع کوه سهند مانند گیرو داغ (۳۵۹۶ متر)، کمال داغ (۳۳۱۰ متر)، برکت‌داغ و

لیقوان داغ سرچشمه می‌گیرد و در طول مسیر خود آبراهه‌های متعددی از جمله توله سرچای و بارلی‌چای را دریافت می‌کند



شکل ۱: نقشه موقعیت حوضه آبخیز لیقوان‌چای در ایران و آذربایجان شرقی، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر تعداد ۱۰ متغیر به منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. این متغیرها عبارتند از: بارش، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، گسل، کاربری اراضی و پوشش گیاهی. برای آماده‌سازی و تهیه این متغیرها از داده‌هایی بدین شرح بهره گرفته شد: متغیرهای ارتفاع، شیب، جهت شیب، طول دامنه و تحدب سطح زمین از روی تصویر مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) با قدرت تفکیک ۲۷ متر استخراج گردیدند. از طریق این تصاویر آبراهه‌های منطقه نیز با استفاده از ابزار Hydrology نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. سازندهای زمین‌شناسی از روی نقشه زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ در محیط نرم‌افزار ArcGIS رقومی گردید. داده‌های هیدرومتری رودخانه لیقوان-چای همچنین لایه کاربری اراضی حوضه مطالعاتی از طریق تصاویر ماهواره-ای گوگل ارث منطقه استخراج گردید. برای تهیه نقشه پوشش گیاهی حوضه مطالعاتی از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel (سنتینل) با قدرت تفکیک ۱۰ متر (اوایل تابستان ۱۳۹۸) بهره گرفته شد. در نهایت، برای تهیه توزیع فضایی بارش منطقه از نقشه لایه هم‌بارش استان اردبیل (تهیه شده توسط آب منطقه‌ای استان اردبیل) استفاده به عمل آمد. در تحقیق حاضر به منظور پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبریز لیقوان‌چای از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در قالب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره گرفته شد. در ادامه کار توضیحاتی در خصوص مدل مورد استفاده ارائه می‌گردد. فرایند تحلیل شبکه‌ای، یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره محسوب می‌گردد و در مجموعه مدل‌های جبرانی قرار می‌گیرد. این مدل بر مبنای فرایند تحلیل سلسله مراتبی طراحی گردیده و در آن، شبکه جایگزین سلسله مراتب شده است.

فرایند تحلیل شبکه برعکس روش تحلیل سلسله مراتبی ساختاری غیرخطی دارد و وابستگی درون خوشه‌ای و وابستگی میان خوشه‌ای را مورد توجه قرار می‌دهد. برای استخراج وزن‌های لایه‌های موضوعی موثر بر رخداد زمین‌لغزش بر اساس مدل مبتنی بر فرایند تحلیل شبکه (ANP) مراحل طی می‌شود:

گام ۱: طراحی ساختار مدل و مساله مورد بررسی: در مرحله نخست می‌بایست مساله پژوهش به روشنی مشخص شده و در چارچوب یک سیستم منطقی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در پژوهش حاضر معیارهای تحقیق به سه خوشه قابل تقسیم می‌باشند. خوشه زمین‌شناسی - ژئومورفولوژیکی که شامل معیارهای سازندهای زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، تحدب سطح زمین و طول دامنه می‌باشد؛ خوشه هیدرواقلم که شامل معیارهای توزیع فضایی بارش و فاصله از رودخانه می‌باشد؛ خوشه پوشش زمین که شامل معیارهای کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشد. زیرمعیارهای تحقیق نیز شامل طبقات هر یک از معیارهای مذکور می‌باشد. گام ۲. مقایسات زوجی و محاسبه وزن نسبی: در مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) محاسبه مقادیر اهمیت نسبی مشابه با مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بوده و با کمک طیف ۱ تا ۹ صورت می‌پذیرد (قنبری و روستایی، ۱۳۹۲). بدیهی است که در طی این فرایند بالاترین وزن یا ارجحیت به تاثیرگذارترین متغیر در رابطه با رخداد زمین‌لغزش اختصاص داده می‌شود. در نرم‌افزار Super Decisions این کار به طرق مختلف (عددی، گرافیکی و شفاهی) قابل انجام است. پس از اینکه وزن‌های نسبی هر معیار از طریق مقایسات زوجی حاصل شد؛ به منظور اعتبارسنجی مقایسات صورت گرفته می‌بایست نرخ ناسازگاری محاسبه شود. در صورتی که نرخ ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ گردد سازگاری سیستم قابل قبول می‌باشد و اگر بیشتر از ۰/۱ گردد بهتر است تصمیم‌گیرنده در قضاوت‌های خود تجدید نظر نماید (دی و رامچارن^۱، ۲۰۰۰). این محاسبات توسط نرم‌افزار Super Decisions به صورت اتوماتیک محاسبه می‌گردد. گام ۳: تشکیل سوپرماتریس اولیه: برای دستیابی به اولویت‌های کلی در یک سیستم با تاثیرات متقابل، بردارهای اولویت‌های داخلی (یعنی W های محاسبه شده) در ستون‌های مناسب یک ماتریس وارد می‌گردند. در نتیجه، یک سوپر ماتریس (در واقع یک ماتریس تقسیم‌بندی شده) که هر بخش از این ماتریس ارتباط بین دو خوشه در یک سیستم را نشان می‌دهد، به دست می‌آید. گام ۴: تشکیل سوپرماتریس وزنی: در گام بعدی برای اینکه سوپرماتریس فوق (اولیه) تبدیل به سوپرماتریس وزندهی شده گردد می‌بایست سوپرماتریسی تشکیل شود که مجموع ستون‌های آن برابر با ۱ باشد (که ماتریس تصادفی نیز نامیده می‌شود). در واقع، ماتریس وزنی از حاصل ضرب داده‌های ماتریس خوشه‌ای در سوپرماتریس وزندهی نشده و نرمالیزه نمودن ماتریس حاصل شده به دست می‌آید (داداش‌پور و همکاران، ۱۳۹۱). گام ۵: محاسبه بردار وزنی عمومی (ماتریس حد): در این مرحله، سوپرماتریس موزون (وزنی) به توان حدی می‌رسد تا عناصر ماتریس همگرا شده و مقادیر سطری آن با هم برابر شوند. بر اساس ماتریس به دست آمده، بردار وزن عمومی مشخص می‌گردد (مکانیکی و صادقی، ۱۳۹۱). سرانجام با مراجعه به جدول سوپرماتریس حد، وزن نهایی هر معیار و زیرمعیار حاصل می‌گردد. هر یک از معیارها با توجه به وزن‌های حاصل شده در محیط نرم‌افزار ArcGIS

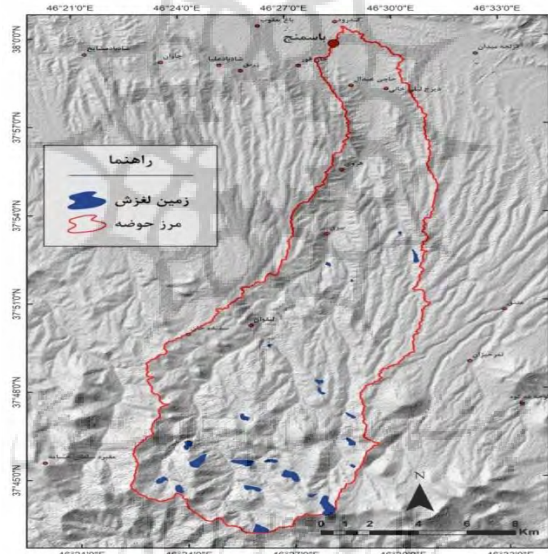
¹- Dey and Ramcharen

طبقه‌بندی مجدد می‌شوند. در نهایت، معیارهای مورد استفاده (معیارهای بازطبقه‌بندی شده) با توجه به وزن‌های حاصل از مدل ANP ترکیب می‌شوند و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش حاصل می‌گردد.

نتایج

توزیع فضایی زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای

در شکل (۲) توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای ارائه شده است. پراکنندگی زمین‌لغزش‌های حوضه مطالعاتی با مراجعه به سازمان منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی تهیه گردید. بر این اساس، در سطح حوضه مطالعاتی تعداد ۲۷ زمین‌لغزش شناسایی شده است. مساحت مجموع زمین‌لغزش‌های منطقه در حدود ۲۶۲ هکتار می‌باشد. اکثر زمین‌لغزش‌های منطقه در بالادست یا نیمه جنوبی حوضه اتفاق افتاده‌اند. بزرگ‌ترین زمین‌لغزش منطقه با مساحت حدود ۴۲ هکتار در منتهی‌الیه جنوب حوضه و در اطراف مخروط‌های آتشفشانی فرعی سهند اتفاق افتاده است. بسیاری از زمین‌لغزش‌های بزرگ منطقه مطالعاتی هنوز هم ناپایدار می‌باشند و در واقع تشکیل پهنه‌های لغزشی می‌دهند که احتمال وقوع لغزش‌ها در سطح این پهنه‌ها وجود دارد. توزیع فضایی زمین‌لغزش‌های منطقه (شکل ۲) می‌تواند به عنوان یک راهنمای مناسبی جهت ارزیابی نقش فاکتورهای مختلف در رخداد این پدیده مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲: پراکنندگی زمین‌لغزش‌ها در حوضه آبخیز ليقوان چای، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

نقش شیب در زمین‌لغزش‌های منطقه: زاویه شیب از جمله متغیرهایی به شمار می‌رود که نقش زیادی در وقوع زمین‌لغزش دارد. به جرات می‌توان بیان داشت که شیب بالای دامنه‌ها از فاکتورهای موثر در وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. به عنوان مثال، مطابق مطالعه‌ای که صورت گرفته است در حدود ۷۵ تا ۸۵ درصد از زمین‌لغزش‌های حادث شده در سانفرانسیسکو بر روی دامنه‌های با شیب تند رخ داده‌اند (Keller, 2015). بنابراین، در پژوهش حاضر، لایه شیب به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در رخداد زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور شیب سطح حوضه آبخیز ليقوان چای از روی تصویر DEM منطقه با قدرت تفکیک فضایی ۱۲/۵ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. با توجه به لایه رستری

شیب، حوضه آبخیز ليقوان چای دارای متوسط شیب ۲۹ درصد با انحراف معیار ۱۷ می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که اولاً ليقوان چای حوضه‌ای محسوب می‌شود که در اکثر قسمت‌ها دارای شیبی تند می‌باشد و ثانياً متغیر شیب از تغییرپذیری مکانی بالایی برخوردار است. این امر با مراجعه به نقشه شیب منطقه شکل (۳) به روشنی قابل مشاهده است. بر اساس محاسبات صورت گرفته طبقات شیب ۰ تا ۵ درصد و ۵ تا ۱۰ درصد به ترتیب ۳ و ۸/۴ درصد از سطح حوضه آبخیز ليقوان چای را شامل می‌شوند و بنابراین اراضی کم‌شیب در سطح حوضه مطالعاتی محدود می‌باشد. اراضی با شیب کم عمدتاً در داخل دره ليقوان چای، مخصوصاً در قسمت‌های پایین دست حوضه، پراکنده شده‌اند. احتمال وقوع زمین‌لغزش در این سطوح شیب بسیار پایین است. هر چند می‌توانند در نتیجه‌ی حرکت مواد دامنه‌های بالادست تحت تاثیر قرار گیرند. در واقع جابجایی مواد لغزش یافته از بالادست به پایین دست می‌باشد. در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای، اکثر زمین‌لغزش‌ها در سطوح پرشیب اتفاق افتاده‌اند. در این رابطه، شیب‌های بالای ۳۰ درصد با مقادیر فراوانی نسبی نزدیک به ۱ یا بالاتر از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، این طبقات شیب را می‌تواند پهنه‌های مستعد زمین‌لغزش در نظر گرفت و از این‌رو از وزن بالاتری برخوردار می‌باشند.

نقش بارش در زمین‌لغزش‌های منطقه: در پژوهش حاضر، بارش یکی از گزینه‌های معیار هیدرواقليم محسوب می‌شود. با توجه به محدود بودن ایستگاه‌های باران‌سنجی در سطح منطقه مطالعاتی، لایه رستری بارش منطقه مطالعاتی از طریق درون‌یابی منحنی‌های هم‌بارش ارائه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع تهیه شد. در شکل (۶) توزیع مکانی بارش در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای ارائه شده است. بر این اساس، تغییرات زیادی در توزیع مکانی بارش در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای مشاهده می‌شود. میانگین بارش سالانه در سطح این حوضه از حدود ۲۹۴ در پایین دست تا ۶۲۵ در بالادست حوضه متغیر است. روند تغییرات مکانی بارش منطقه مطالعاتی رابطه مستقیمی را با روند تغییرات ارتفاعی نشان می‌دهد. در واقع، تغییرات مکانی شدید در بارش سالانه منطقه بازتابی از تغییرات ارتفاعی منطقه می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً بیان گردید ليقوان چای بخش‌هایی از دامنه شمالی توده آتشفشانی حجیم سهند را زهکشی می‌کند از این‌رو اختلاف ارتفاع شدیدی در این حوضه برقرار است؛ به گونه‌ای که دامنه تغییرات ارتفاع در حوضه ليقوان چای به بیش از ۲۳۰۰ متر بالغ می‌شود. با افزایش ارتفاع منطقه بر میزان بارش نیز افزوده می‌شود. بدیهی است که بخش اعظمی از بارش‌های بالادست حوضه به صورت برف می‌باشد. ذوب برف در اواخر زمستان و اوایل بهار و نفوذ آب ناشی از آن در سطح دامنه‌ها شرایط مساعدی را برای رخداد زمین‌لغزش فراهم می‌نماید.

نقش مجاورت با آبراهه‌ها در زمین‌لغزش‌های منطقه: در پژوهش حاضر، مجاورت یا فاصله از آبراهه‌ها دومین گزینه معیار هیدرواقليم به شمار می‌رود. آبراهه‌ها عامل محرک رخداد زمین‌لغزش محسوب می‌شوند. در واقع، آبراهه‌ها با فرسایش و شستشوی مواد پای دامنه‌ها باعث ناپایداری مواد سطحی موجود در منطقه می‌شوند. بنابراین، جزو متغیرهایی به شمار می‌رود که می‌بایست در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش مشارکت داده شود. بدین منظور، ابتدا آبراهه‌های حوضه آبخیز ليقوان چای با استفاده از تصویر DEM منطقه استخراج گردید. در این زمینه از ابزار هیدرولوژی نرم‌افزار ArcGIS بهره گرفته شد که قابلیت‌هایی بالایی جهت تعیین حدود حوضه‌ها و استخراج شبکه‌های زهکشی برخوردار است. در مرحله

بعدی نسبت به ایجاد لایه فاصله از آبراه اقدام گردید. بدین منظور از تابع فاصله اقلیدسی در نرم‌افزار ArcGIS استفاده به عمل آمد. در شکل (۷) نقشه فاصله از آبراه‌های حوضه آبخیز ليقوان‌چای در ۱۰ کلاس ارائه شده است. با توجه به اینکه حدود ۲۰ درصد توده‌های لغزشی منطقه در مجاورت بلافاصله آبراه‌های منطقه (فاصله ۰ تا ۵۰ متری) پراکنده شده‌اند. شماری از این لغزش‌ها در نتیجه‌ی فرایندهای زیرشویی و برداشت مواد زیرین دامنه‌ها توسط جریان رودخانه‌ها اتفاق افتاده‌اند. در واقع، با توجه به محاسبات صورت گرفته با افزایش فاصله از آبراه‌ها از میزان لغزش‌های منطقه کاسته شده است. در کل، می‌توان بیان داشت که نزدیکی به آبراه‌ها به عنوان یکی از شرایط مستعد ناپایداری دامنه‌ای در حوضه آبخیز ليقوان‌چای به شمار می‌رود. آبراه‌ها با فرایندهای فرسایشی، ایجاد اختلاف شیب و مهیا نمودن رطوبت بالا وقوع زمین‌لغزش در منطقه را مساعدت می‌کنند. بنابراین، در شرایط برابر، پهنه‌های مجاور آبراه‌ها از پتانسیل بالایی برای ناپایداری دامنه‌ای برخوردار می‌باشند.

نقش سازندهای زمین‌شناسی در زمین‌لغزش‌های منطقه: در پژوهش حاضر، معیار زمین‌شناسی شامل دو گزینه سازندهای زمین‌شناسی و گسل‌های منطقه می‌باشند. این متغیرها از روی نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه‌های اسکو و بستان‌آباد استخراج گردید. حوضه آبخیز ليقوان‌چای بخش‌هایی از دامنه شمالی توده آتشفشانی سهند را زهکشی می‌کند بنابراین لیتولوژی منطقه مطالعاتی عمدتاً مربوط به سازندهای آتشفشانی می‌باشد. بخش اعظم منطقه مطالعاتی متشکل از سنگ‌های آتشفشانی یا در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی سهند است. سنگ‌های آذرین حوضه آبخیز ليقوان‌چای شامل سنگ‌های آذرین بیرونی (داسیت و آندزیت) می‌باشند. سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه در نتیجه‌ی فعالیت‌های آتشفشانی سهند در طی نئوژن و پلیوکواترنری شکل گرفته‌اند و بخش اعظم واحد مرتفع کوهستانی در جنوب حوضه را می‌پوشانند. سنگ‌های آذرین بیرونی منطقه شامل سه واحد Nga (آندزیت و داسیتیک آندزیت دوره نئوژن)، PLQd (داسیت دوره پلیوکواترنری) و PLQd-a (داسیتیک آندزیت و کواتر آندزیت دوره پلیوکواترنری) می‌باشند. بخش‌های بالادست حوضه (قسمت جنوبی حوضه) منطبق بر این واحدها می‌باشند. نکته قابل توجه مربوط به پراکنندگی زمین‌لغزش‌ها بر روی این واحدهاست؛ به گونه‌ای که در حدود ۴۲ درصد زمین‌لغزش‌های منطقه بر روی واحد PLQd-a و ۴۳ درصد زمین‌لغزش‌ها بر روی واحد Nga اتفاق افتاده‌اند. این در حالی است که دو واحد مزبور به ترتیب حدود ۱۴/۵ و ۱۵/۶ درصد از سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای را پوشانده‌اند. این امر نشان می‌دهد که این سازندها با توجه به فرایندهای هوازدگی و تخریب در این شرایط آب و هوایی از پتانسیل بالاتری نسبت به سایر سازندهای منطقه برای وقوع زمین‌لغزش برخوردار هستند. رسوبات ولکانوسدیمانتر توده کوهستانی سهند، منشأ آبرفتی دارد که در مناطق خشک و یا کم عمق دریا رسوب‌گذاری کرده‌اند. واحد PLQC جزو این نوع سازندها به شمار می‌رود که در حدود ۴۵ درصد از سطح حوضه را پوشش داده است. با این حال، تنها در حدود ۵/۴ درصد از زمین‌لغزش‌های منطقه بر روی این واحد اتفاق افتاده‌اند. یکی از دلایل این امر را علاوه بر آسیب‌پذیری کمتر این واحد نسبت به فرایندهای تخریب توده‌ای می‌توان به موقعیت جای‌گیری این سازندها نسبت داد. این واحد به طور عمده در قسمت‌های میانی و پایین‌دست حوضه پراکنده شده‌اند و در نتیجه با محدودیت‌هایی جهت لغزش مواجه شده‌اند که از جمله می‌توان به بارش کمتر و تعدیل شیب‌های تند بالادست اشاره نمود. در برخی از

قسمت‌های حوضه (مخصوصاً در اطراف رودخانه ليقوان‌چای در پایین‌دست حوضه) آبرفت‌های کوتاه‌تری قابل مشاهده‌اند. این آبرفت‌ها بر روی طبقات ولکانوسدیمانتر قرار گرفته‌اند و حاصل فعالیت عوامل فرسایش دوران کوتاه‌تر هستند. علاوه بر مساحت اندک این واحد در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای، در اکثر موارد، این سازندها به دلیل قرارگیری در اراضی هموار و کم‌شیب نسبت به حرکات توده‌ای از حساسیت پایین‌تری برخوردار می‌باشند.

نقش گسل‌ها در زمین‌لغزش‌های منطقه: اغلب نواحی کوهستانی که نسبت به زمین‌لغزش‌ها آسیب‌پذیر می‌باشند، حداقل فعالیت‌های زمین‌لرزه‌ای را در زمان‌های مختلف تجربه نموده‌اند. زمین‌لرزه‌ها در نواحی مستعد لغزش با شیب زیاد باعث افزایش احتمال وقوع زمین‌لغزش می‌شوند. به عنوان نمونه، زمین‌لرزه‌ای بزرگ در سال ۱۹۶۴ در آلاسکا در ایالات متحده منجر به زمین‌لغزشی وسیع گردید که زیان‌های مالی بسیاری را تحمیل نمود (Highland, 2008). از اینرو، با توجه به رابطه مستقیم وجود گسل و بروز زلزله، در نواحی با گسل‌های فراوان احتمال وقوع زمین‌لغزش افزایش می‌یابد. بنابراین، جنبش گسل‌های فعال یکی از مهم‌ترین عوامل محرک در رخداد زمین‌لغزش به شمار می‌رود. بدین ترتیب، در پژوهش حاضر، فاصله از گسل‌های منطقه به عنوان یکی از گزینه‌های معیار زمین‌شناسی برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای مورد استفاده قرار گردید. در این رابطه ابتدا لایه گسل‌های منطقه از روی نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه‌های اسکو و بستان‌آباد استخراج گردید. سپس لایه فاصله از گسل با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. در محدوده مورد مطالعه چندین گسل فرعی وجود دارند. برای مثال در روستای ليقوان گسل فرعی وجود دارد که این گسل از چندین گسل فرعی دیگر تشکیل شده است. یکی از گسل‌های بزرگ حوضه، گسلی است که از غرب کوه آتشفشان قلعه مترو شروع شده است و در نزدیکی روستای ليقوان با گسل دیگری که از مرز غربی کشیده شده است، در دره اصلی رود ليقوان‌چای برخورد می‌کند. در شکل (۹) فاصله از گسل‌های منطقه ارائه شده است. با توجه به محاسبات صورت گرفته بخش قابل‌توجهی از زمین‌لغزش‌های منطقه در مجاورت گسل‌ها اتفاق افتاده‌اند؛ به گونه‌ای که در حدود ۲۳ درصد از توده‌های لغزشی منطقه در فاصله ۰ تا ۳۰۰ متری از گسل‌ها و در حدود ۳۵/۵ درصد از آنها در فاصله ۳۰۰ تا ۶۰۰ متری از گسل‌ها واقع شده‌اند. همچنین نسبت فراوانی در این دو کلاس ارقام بالایی را نشان می‌دهد. مقدار این نسبت برای فاصله ۰ تا ۳۰۰ متری ۲/۰۳ و برای فاصله ۳۰۰ تا ۶۰۰ متری ۲/۸۹ می‌باشد. بنابراین، با توجه به ارقام بالای نسبت فراوانی، احتمال وقوع زمین‌لغزش در این پهنه‌ها بالاست. می‌توان بیان داشت که گسل‌های منطقه به عنوان یک عامل محرک زمین‌لغزش محسوب می‌شوند که با جنبش‌های، هر چند ضعیف خود، می‌توانند باعث تحریک مواد مجاور خود شود. این امر مخصوصاً مواقعی که به دلیل حضور آب، وزن مواد سطح دامنه‌ها افزایش پیدا می‌کند و برعکس اصطکاک کاهش می‌یابد، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در صورت وقوع زمین‌لرزه در منطقه (حتی با بزرگای کم) اهمیت مجاورت با گسل در وقوع زمین‌لغزش به شدت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مطالعاتی، نزدیکی به گسل به عنوان یک متغیر محرک مد نظر قرار گرفت. بدیهی است مناطق مجاور گسل‌های منطقه از وزن بیشتری برخوردار می‌شوند که با فاصله از آن وزن کلاس‌ها کاهش پیدا می‌کند.

نقش کاربری اراضی در زمین‌لغزش‌های منطقه: در پژوهش حاضر برای ارزیابی پوشش زمین و نقش آن در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه از دو لایه کاربری اراضی و پوشش گیاهی استفاده به عمل آمد. این دو لایه به همراه لایه فاصله از جاده‌ها گزینه‌های معیار انسانی یا آنتروپوژنیک پژوهش به شمار می‌روند. در شکل (۱۰) توزیع مکانی انواع کاربری‌های اراضی در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای ارائه شده است. به تبعیت از اقلیم منطقه آذربایجان، بخش اعظمی از پوشش زمین در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای از نوع استپی می‌باشد. در واقع، به دلیل حاکمیت شرایط اقلیمی نیمه‌خشک بر بخش عمده‌ای از منطقه مطالعاتی، پوشش مرتعی نوع غالب پوشش در حوضه آبخیز ليقوان‌چای به شمار می‌رود. در این رابطه، مراتع متراکم، نیمه متراکم و کم تراکم به ترتیب حدود ۴۷، ۱۱ و ۳ درصد از سطح حوضه را شامل می‌شوند. در حالت کلی، به تبعیت از افزایش ارتفاع و افزایش بارش منطقه و همچنین کاهش دخالت‌های انسانی، بر تراکم پوشش گیاهی افزوده می‌شود و مراتع ضعیف قسمت‌های پایین دست حوضه به مراتع با تراکم خوب و بسیار خوب در قسمت‌های بالادست تبدیل می‌گردد. بخش عمده‌ای از فعالیت‌های کشاورزی منطقه به صورت اراضی دیم است که در حدود ۳۲ درصد از سطح حوضه را دربرمی‌گیرند. اراضی کشاورزی آبی منطقه، به صورت زراعت و مخصوصا باغات، تنها در حدود ۶/۴ درصد از سطح حوضه را شامل می‌شوند که در دره و اطراف رودخانه ليقوان‌چای تمرکز یافته‌اند. مناطق مسکونی حوضه نیز شامل روستاها و قسمت‌هایی از شهر باسمنج می‌باشد که سطحی در حدود ۳۰۹ هکتار از حوضه ليقوان‌چای را اشغال کرده‌اند. با توجه به محاسبات صورت گرفته بخش عمده‌ای از زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی در کاربری‌های مراتع اتفاق افتاده‌اند. در این رابطه، بالغ بر ۸۸/۵ درصد توده‌های لغزشی منطقه بر روی کاربری مراتع متراکم، ۱/۳ درصد بر روی کاربری مراتع نیمه متراکم و ۵/۷ درصد بر روی مراتع کم تراکم واقع شده‌اند. همچنین در حدود ۴/۴ درصد از توده‌های لغزشی منطقه بر روی کاربری دیم جای گرفته‌اند. دو کاربری کشاورزی آبی و مناطق مسکونی تقریبا عاری از زمین‌لغزش می‌باشند. این توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها بر روی کاربری‌های اراضی به صورت غیرمستقیم دلالت بر شرایط محیطی موثر بر زمین‌لغزش‌های منطقه دارد. می‌توان گفت که مجموعه‌ای از شرایط مستعد باعث شده است که تمرکز اصلی زمین‌لغزش‌ها بر روی پوشش مرتعی خوب منطقه باشد از جمله: حضور آب در پیدایش زمین‌لغزش‌ها بسیار مهم است و می‌توان گفت در جاهایی که مراتع خوب شکل گرفته‌اند مقادیر بالاتری از آب وجود دارد. این شرایط مخصوصا در اواخر زمستان و اوایل بهار با دخالت مشترک بارش باران و ذوب برف برقرار است. پهنه‌های با مراتع خوب منطبق بر اراضی پرشیب می‌باشند و در نتیجه، وقوع زمین‌لغزش مساعدت می‌گردد. این در حالی است که کاربری کشاورزی آبی منطقه منطبق بر اراضی هموار و کم‌شیب می‌باشد و آشکار است که امکان وقوع زمین‌لغزش در این پهنه‌ها بسیار محدود می‌باشد. همچنین کاربری دیم در قسمت‌های میانی و پایین دست حوضه تمرکز یافته‌اند که در این قسمت‌ها به دلیل مقادیر بارش اندک، کم‌آبی و وجود شیب‌های ملایم احتمال وقوع زمین‌لغزش کاهش پیدا می‌کند.

نقش پوشش گیاهی در زمین‌لغزش‌های منطقه: در پژوهش حاضر، توزیع فضایی پوشش گیاهی منطقه به عنوان مکمل کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت و نقش آن در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه از طریق تقطیع آن با لایه توزیع فضایی زمین‌لغزش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. تاثیر پوشش گیاهی در پایداری دامنه وابسته به ویژگی‌های محلی، عمق

خاک، شیب دامنه، نوع گیاهان، وضعیت خردشدگی سنگ‌ها و اقلیم منطقه استدر پژوهش حاضر به منظور تهیه نقشه توزیع فضایی پوشش گیاهی حوضه آبخیز ليقوان چای از شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی^۱ (NDVI) استفاده به عمل آمد. این شاخص بر اساس رابطه زیر از طریق تصاویر ماهواره‌ای قابل استخراج است (Liu and Mason, 2009: 27):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه ۱}$$

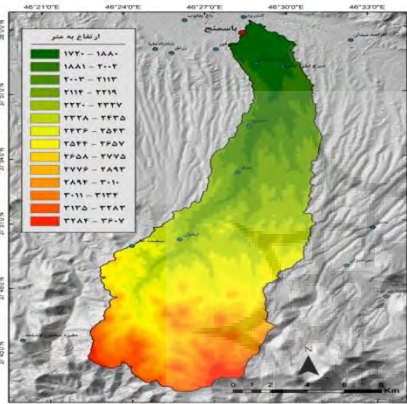
در رابطه فوق NIR نشان‌دهنده یک باند مادون قرمز و Red نشان‌دهنده یک باند قرمز می‌باشد. در پژوهش حاضر، برای تهیه این شاخص از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel (اوایل تابستان سال ۱۳۹۸ ه. ش) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده شد. باندهای ۴ و ۸ این ماهواره به ترتیب در طیف قرمز و مادون قرمز سطح زمین را اسکن می‌نمایند.

مقادیر شاخص NDVI بین -۱ تا +۱ می‌باشد. ابر، آب و برف به دلیل جذب طیف مادون قرمز دارای مقادیر منفی می‌باشند. خاک و سنگ و در کل، اراضی بایر و بدون پوشش گیاهی دارای مقادیر NDVI نزدیک به صفر می‌باشند. اما، پوشش گیاهی فعال دارای مقادیر NDVI مثبت می‌باشد که در حدود ۰/۱ تا ۰/۶ در نوسان است. بدیهی است هر چه تراکم پوشش گیاهی منطقه بالاتر باشد مقادیر NDVI به +۱ متمایل خواهد شد. در شکل (۱۱) توزیع فضایی شاخص NDVI در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای در هفت کلاس ارائه شده است. با نگاه کلی به توزیع فضایی این شاخص می‌توان بیان داشت که حوضه آبخیز ليقوان چای از پوشش گیاهی نسبتاً ضعیفی برخوردار است؛ به گونه‌ای که در حدود ۴۴ درصد از سطح حوضه دارای مقادیر NDVI کمتر از ۰/۱۹ می‌باشد و تنها در حدود ۱۲ درصد از سطح آن، مقادیر NDVI بالاتر از ۰/۵ است. با صرف نظر از اراضی کشاورزی آبی منطقه در دره آبراهه اصلی حوضه (رودخانه ليقوان) حوضه آبخیز ليقوان چای را از نظر پوشش گیاهی می‌توان به دو بخش نسبتاً مشخص تقسیم‌بندی کرد: پهنه‌های با پوشش گیاهی ضعیف که منطبق بر نیمه شمالی حوضه می‌باشد و از پایین دست حوضه تا محدود روستای ليقوان امتداد می‌یابد و پهنه‌های با پوشش گیاهی خوب تا بسیار خوب که بالادست حوضه را شامل می‌شود. محدوده مذکور از غرب به منطقه حفاظت‌شده سهند و از جنوب به منطقه حفاظت‌شده صوفی چای ختم می‌شود. با وجود این، محدوده حوضه ليقوان چای هنوز جزو مناطق حفاظت‌شده نمی‌باشد. این محدوده از حوضه آبخیز ليقوان چای دارای پوشش گیاهی مرتعی بسیار مطلوبی می‌باشد و با مقادیر بالای شاخص NDVI مشخص می‌گردند. علاوه بر این پهنه‌ها، اراضی کشاورزی آبی منطقه نیز با مقادیر بالای NDVI (بیشتر از ۰/۵) مشخص شده‌اند (شکل ۱۱).

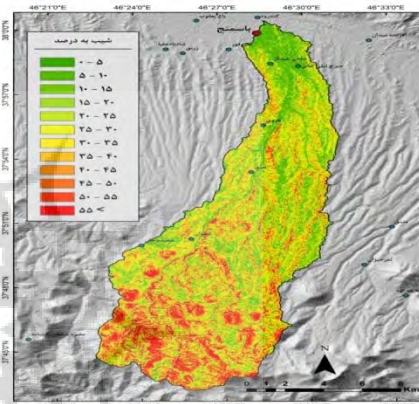
نقش جاده‌ها در زمین‌لغزش‌های منطقه: بخش زیادی از زمین‌لغزش‌ها در طی ترانشه‌زنی در بزرگراه‌ها، راه‌آهن یا کانال‌ها رخ می‌دهند. همچنین، این چنین لغزش‌هایی در معادن عمومیت دارند. این گسیختگی‌ها احتمال دارد در حین عملیات و یا بعد از اتمام پروژه رخ دهند. درواقع، همان‌گونه که بارگذاری روی دامنه می‌تواند محرک ناپایداری محسوب شود، باربرداری در نتیجه حفاری نیز می‌تواند در بعضی خاک‌ها یا سنگ‌ها منجر به ناپایداری دامنه‌ای گردد (شریعت جعفری، ۱۳۷۵: ۸). بنابراین در پژوهش حاضر، فاصله از جاده به عنوان یکی از گزینه‌های معیار آنتروپوژنیک در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین-لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان چای مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور، جاده‌های منطقه با مراجعه به تصاویر

^۱- Normalized difference water index (NDVI)

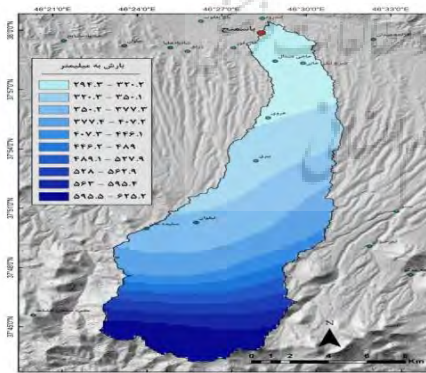
ماهواره‌ای گوگل ارث استخراج گردید و سپس لایه فاصله از جاده‌ها با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. شکل (۱۲) فاصله از جاده در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای را در ۱۰ کلاس با فاصله طبقات ۱۵۰ متر نشان می‌دهد. جاده‌های بالادست حوضه خاکی بوده و با اهداف مختلف ایجاد شده‌اند. با توجه به نتایج می‌توان گفت که ارتباط ضعیفی بین وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه با فاصله از جاده‌ها برقرار است. تنها در حدود ۷ درصد از توده‌های لغزشی منطقه در مجاورت جاده‌ها (فاصله ۰ تا ۱۵۰ متری) واقع شده‌اند. با این حال، لایه فاصله از جاده در پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای مورد استفاده قرار گرفت. بدیهی است که لایه فاصله از جاده، با توجه به نقش محدود و ناشناخته این فاکتور در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه، از وزن پایینی برخوردار خواهد بود. در جدول ۱ سوپر‌ماتریس اولیه و ناموزن پژوهش ارائه شده است. در جدول ۱ تا ۳ نیز سوپر‌ماتریسهای پژوهش ارائه شده است.



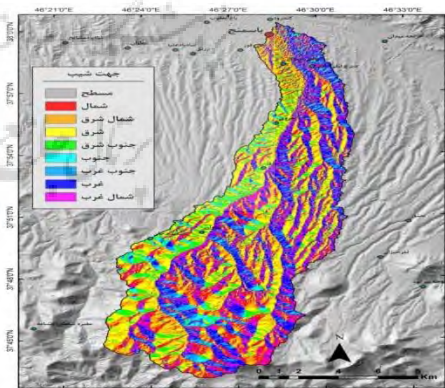
شکل ۴: توزیع ارتفاعات در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.



شکل ۳: توزیع طبقات مختلف شیب در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.



شکل ۶: توزیع مکانی بارش در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.



شکل ۵: توزیع جهات شیب در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

جدول ۱: سوپرماتریس اولیه و ناموزن پژوهش، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

		Alternatives									Criteria				Goa
		بارش	جهت شیب	سازندهای زمین	شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	آنتروپوژنیک	زمین شناسی	فیزیوگرافی	هیدرواقليم	خطر زمین لغزش
Alternatives	بارش	0.00	0.16	0.21	0.23	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00
	جهت شیب	0.12	0.00	0.13	0.14	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00
	سازندهای زمین	0.25	0.24	0.00	0.36	0.23	0.23	0.24	0.23	0.23	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00
	شیب	0.38	0.37	0.41	0.00	0.36	0.36	0.37	0.36	0.36	0.00	0.00	0.83	0.00	0.00
	فاصله از آبراهه	0.06	0.06	0.06	0.07	0.00	0.04	0.05	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00
	فاصله از جاده	0.02	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
	فاصله از گسل	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.05	0.00	0.05	0.05	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00
	پوشش گیاهی	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00
Criteria	کاربری اراضی	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
	آنتروپوژنیک	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33	0.33	0.09
	زمین شناسی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.33	0.33	0.27
	فیزیوگرافی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33	0.00	0.33	0.46
Goal	خطر زمین لغزش	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

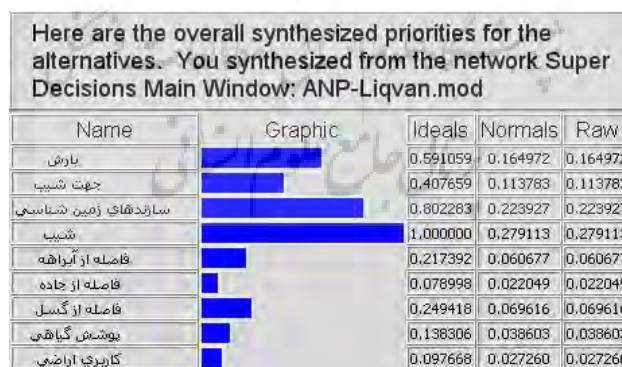
جدول ۲: سوپرماتریس موزون پژوهش، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

		Alternatives									Criteria				Goal
		بارش	جهت شیب	سازندهای زمین	شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	آنتروپوژنیک	زمین شناسی	فیزیوگرافی	هیدرواقليم	خطر زمین لغزش
Alternatives	بارش	0.00	0.16	0.21	0.23	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00
	جهت شیب	0.13	0.00	0.14	0.15	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00
	سازندهای زمین	0.26	0.24	0.00	0.36	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00
	شیب	0.39	0.37	0.41	0.00	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00
	فاصله از آبراهه	0.06	0.06	0.07	0.07	0.00	0.05	0.06	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00
	فاصله از جاده	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
	فاصله از گسل	0.07	0.07	0.08	0.08	0.06	0.05	0.00	0.06	0.05	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00
	پوشش گیاهی	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.00	0.03	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
Criteria	کاربری اراضی	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
	آنتروپوژنیک	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.17	0.10
	زمین شناسی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.17	0.17	0.28
	فیزیوگرافی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.00	0.17	0.47
Goal	هیدرواقليم	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.17	0.17	0.00	0.16

Goal	خطر زمین لغزش	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
------	---------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

جدول ۳: سوپرماتریس حد پژوهش، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

		Alternatives									Criteria				Goal
		بارش	جهت شیب	سازندهای زمین	شیب	فاصله از آبراهه	فاصله از جاده	فاصله از گسل	پوشش گیاهی	کاربری اراضی	آنتروپوژنیک	زمین شناسی	فیزیوگرافی	هیدرواقلیم	خطر زمین لغزش
Alternatives	بارش	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	جهت شیب	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	سازندهای زمین	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
	شیب	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	فاصله از آبراهه	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
	فاصله از جاده	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	فاصله از گسل	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
	پوشش گیاهی	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	کاربری اراضی	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Criteria	آنتروپوژنیک	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	زمین شناسی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	فیزیوگرافی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	هیدرواقلیم	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Goal	خطر زمین لغزش	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



شکل ۱۳: وزن معیارهای موثر بر رخداد زمین لغزش در حوضه آبخیز ليقوان چای با استفاده از مدل ANP، منبع: نویسندگان

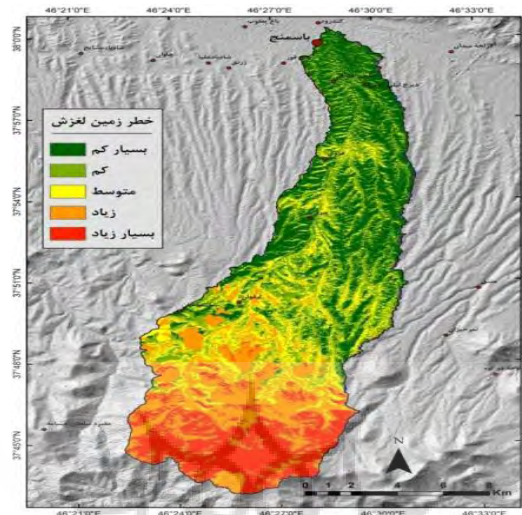
۱۴۰۲.

با توجه به وزن‌های حاصل از مدل ANP، متغیرهای موثر بر رخداد زمین لغزش‌های حوضه آبخیز ليقوان چای را می‌توان به سه دسته طبقه‌بندی نمود: متغیرهای با اثرگذاری بسیار بالا: این متغیرها به ترتیب شامل متغیر شیب (با وزن ۰/۲۷۹)، متغیر

سازندهای زمین‌شناسی (با وزن ۰/۲۲۴) و متغیر بارش (با وزن ۰/۱۶۵) می‌باشند. به جرات می‌توان گفت که این متغیرها جزو کنترل‌کننده‌های اصلی زمین‌لغزش‌های منطقه مطالعاتی به حساب می‌آیند. این متغیرها با کنترل بر روی نفوذپذیری، عمق مواد سطحی، حضور آب، نیروی ثقل و ... نقش بسیار زیادی در رخداد زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای دارند. متغیرهای با اثرگذاری متوسط: این متغیرها شامل متغیر جهت شیب (با وزن ۰/۱۱۴)، متغیر فاصله از گسل (با وزن ۰/۰۷۰) و متغیر فاصله از آبراهه (با وزن ۰/۰۶۱) می‌باشند. هر چند اهمیت این متغیرها نسبت به متغیرهای فوق‌الذکر کمتر است اما در برخی موارد نقش عمده و اصلی را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه ایفا می‌نمایند. به عنوان مثال، فرسایش پای دامنه‌ها توسط جریان رودخانه می‌تواند شرایط مناسبی را برای وقوع زمین‌لغزش مهیا نماید. نقش این متغیرها در بیشتر موارد به صورت محلی می‌باشد.

متغیرهای با اثرگذاری کم: این متغیرها به ترتیب کاهش اهمیت شامل متغیر پوشش گیاهی (با وزن ۰/۰۳۹)، متغیر کاربری اراضی (با وزن ۰/۰۲۷) و متغیر فاصله از جاده (با وزن ۰/۰۲۲) می‌باشند. اثر این متغیرها در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضه آبخیز ليقوان‌چای به صورت محلی می‌باشند و می‌توانند به صورت موضعی احتمال وقوع زمین‌لغزش را کاهش یا افزایش (شکل ۱۴)، لایه‌های موضوعی در بستر سیستم اطلاعات ANP دهند. در نهایت، با توجه به وزن‌های حاصل از مدل ترکیب و یکپارچه شدند. از این طریق نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان-GIS جغرافیایی (چای حاصل گردید. در شکل (۱۵) پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای در پنج کلاس خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور می‌توان به نتایج زیر دست یافت: در حدود ۲۱ درصد از مساحت حوضه آبخیز ليقوان‌چای در کلاس خطر زمین‌لغزش زیاد و در حدود ۱۵ درصد آن در کلاس خطر بسیار زیاد واقع شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که حوضه مطالعاتی از پتانسیل بالایی جهت رخداد زمین‌لغزش برخوردار است. از نظر توزیع مکانی رخداد زمین‌لغزش، می‌توان بیان داشت که اکثر پهنه‌های با خطر بالا و بسیار بالای رخداد زمین‌لغزش در قسمت‌های بالادست حوضه واقع شده‌اند. در واقع، مجموعه‌ای از شرایط محیطی مستعد باعث شده است که این قسمت‌ها از پتانسیل بالایی برای وقوع زمین‌لغزش برخوردار باشند. از جمله این شرایط می‌توان به شیب بالا، دریافت زیاد نزولات جوی، سازندهای زمین‌شناسی مستعد، وجود خطوط شکستگی و گسله‌ها و غلبه جهت‌های شیب شمالی اشاره کرد. این در حالی است که بخش اعظمی از قسمت‌های میانی و پایین‌دست حوضه آبخیز ليقوان‌چای در کلاس خطر کم و بسیار کم واقع شده‌اند. در این مناطق، هر چند به صورت محلی امکان وقوع زمین‌لغزش بالاست اما از گستردگی زیادی برخوردار نیستند. در واقع، اغلب زمین‌لغزش‌های این محدوده از نوع لغزش‌های سطحی می‌باشند (به عنوان مثال شکل ۱۴). تمرکز پهنه‌های خطرناک لغزشی در بالادست حوضه باعث کاهش مخاطرات انسانی ناشی از رخداد این پدیده شده است. با وجود این، زمین‌لغزش‌های بالادست می‌تواند اثرات مخرب مختلفی را به همراه داشته باشند. از جمله‌ی این پیامدهای نامطلوب می‌توان به تخریب مراتع و تولید فراوان رسوب اشاره نمود. حتی مناطق مسکونی مهمی

مانند روستاهای ليقوان و سفیده‌خان می‌توانند تحت تاثیر زمین‌لغزش‌های مخرب واقع شوند. مقایسه توزیع فضایی زمین‌لغزش‌های منطقه (شکل ۲) و نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش حوضه آبخیز ليقوان‌چای (شکل ۱۵) نشان‌دهنده دقت در ارزیابی مکانی خطر وقوع زمین‌لغزش می‌باشد. بنابراین، نتایج این مدل می‌تواند جهت برنامه‌ریزی-ANP بلای مدل‌های محیطی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۵: پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز ليقوان‌چای با استفاده از مدل

ANP، منبع: نویسندگان ۱۴۰۲.

نتیجه‌گیری

به منظور پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در سطح حوضه آبخیز ليقوان‌چای از ۹ متغیر مکانی بهره گرفته شد. برای پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش می‌بایست متغیرهای موثر بر وقوع این پدیده تلفیق و یکپارچه شوند تا پهنه‌هایی که از شرایط مستعدی برای وقوع زمین‌لغزش برخوردار هستند شناسایی گردند. با توجه به اینکه هر کدام از معیارها از نقش متفاوتی در وقوع زمین‌لغزش برخوردار می‌باشند لذا می‌بایست به هر یک از آنها وزنی متناسب اختصاص داده شود. در پژوهش حاضر برای تعیین وزن هر یک از متغیرها از مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده به عمل آمد. توجه هم‌زمان به روابط درونی و بیرونی بین معیارها مهم‌ترین مزیت مدل ANP نسبت به سایر مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، از قبیل مدل AHP، می‌باشد. در راستای اهداف تحقیق، متغیرهای مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوضه آبخیز ليقوان‌چای در قالب ۴ معیار فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، هیدرواقليم و آنتروپوژنیک طبقه‌بندی شدند. معیار فیزیوگرافی شامل دو زیرمعیار شیب و درجه شیب، معیار زمین‌شناسی شامل دو زیرمعیار سازندهای زمین‌شناسی و فاصله از گسل، معیار هیدرواقليم شامل دو زیرمعیار بارش و فاصله از آبراهه، و در نهایت معیار آنتروپوژنیک شامل سه زیرمعیار کاربری اراضی، پوشش گیاهی و فاصله از جاده می‌باشد. نتایج حاصل از مدل ANP نشان می‌دهد که سه متغیر شیب (با وزن ۰/۲۷۹)، سازندهای زمین‌شناسی (با وزن ۰/۲۲۴) و بارش (با وزن ۰/۱۶۵) موثرترین متغیرهای دخیل در رخداد زمین‌لغزش در مقیاس حوضه آبخیز ليقوان‌چای می‌باشند. در واقع، این متغیرها با

فراهم نمودن شرایط مستعد، وقوع زمین لغزش‌های منطقه را کنترل می‌کنند. همچنین، پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش از طریق روی هم گذاری معیارهای تحقیق با استفاده از ضرایب حاصل از مدل ANP در چارچوب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) نشان داد که در حدود ۳۶ درصد از سطح حوضه در کلاس خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. بخش اعظمی از این پهنه‌ها در بالادست حوضه واقع شده‌اند. دخالت همزمان چندین عامل باعث شده است که قسمت‌های بالادست حوضه ليقوان‌چای از شرایط مناسبی برای وقوع زمین لغزش برخوردار شوند. در این رابطه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: قسمت‌های بالادست حوضه بسیار ناهموار و پرشیب بوده و در نتیجه ذاتا جزو سطوح ناپایدار حوضه محسوب می‌شوند. با توجه به اهمیت شیب در ناپایداری‌های دامنه‌ای می‌توان به نقش این عامل در بالادست حوضه پی‌برد. قسمت‌های بالادست حوضه از نزولات جوی بالایی برخوردار هستند. این امر مخصوصا در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار با مشارکت آب ناشی از ذوب برف‌ها برجسته‌تر می‌شود. با توجه به اینکه حضور آب در رخداد زمین لغزش از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است می‌توان به نقش این متغیر در بالادست حوضه پی‌برد. زمین لغزش‌های منطقه عمدتا بر روی سازندهای آتشفشانی داسیتی و آندزیتی رخ داده‌اند. در واقع دخالت فرایندهای هوازدگی پوششی از مواد هوازده را بر روی این تشکیلات فراهم نموده است. توزیع این سنگ‌ها در بالادست حوضه یکی از دلایل اساسی رخداد زمین لغزش در قسمت‌های بالادست حوضه ليقوان‌چای به شمار می‌رود. علاوه بر این، در این قسمت از حوضه چندین خط شکستگی و گسله وجود دارد. جنبش این گسله‌ها، هر چند به صورت جزئی، می‌تواند محرک زمین لغزش باشد. در قسمت‌های بالادست حوضه، جهت‌های شمالی غلبه دارد و به دلیل وجود شرایط مختلف از قبیل ماندگاری بیشتر برف و رطوبت بالا این جهت‌ها مستعد زمین لغزش می‌باشند. کاربری اراضی و پوشش گیاهی قسمت‌های بالادست حوضه عمدتا از نوع مراتع خوب و متراکم می‌باشد. این مراتع با توجه به کم عمق بودن ریشه‌ها نمی‌توانند باعث تثبیت پوشش مواد عمیق شوند و با افزایش نفوذ آب، افزایش بار و کاهش اصطکاک می‌توانند باعث وقوع زمین لغزش گردید.

منابع

- ایزدی، ز.، انتظاری، م. ۱۳۹۲. زمین لغزش‌های ایران (معرفی، عوامل و مدیریت). رشد آموزش جغرافیا، ۱۳۲-۳۷.
- جعفری، ت.، گلی مختاری، ل.، ناعمی تبار، م. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خطر لغزش در حوضه آبریز بدرانلو با استفاده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP). نشریه فضای جغرافیایی، ۱۹(۶۶): ۱-۱۷.
- جمال آبادی، ج.، صفری، ف.، برآبادی، ع.، آل محمد، م. ۱۳۹۹. شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در دهستان زاوورد براساس مدل تلفیقی فازی و فرایند تحلیل شبکه، مدیریت بحران، ۱۰(۲): ۵۵-۴۷.
- داداش‌پور، ه.، خدابخش، ح. ر.، رفیعیان، م. ۱۳۹۱. تحلیل فضایی و مکان‌یابی مراکز اسکان موقت با استفاده از تلفیق فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS). مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱: ۱۱۱-۱۳۱.

- زبردست، اسفندیار، ۱۳۸۹. کاربرد فرآیند تحلیل شبکه ای (ANP) در برنامه ریزی شهری و منطقه ای، نشریه هنرهای زیبا- معماری و شهرسازی، ۴۱: ۷۹-۹۰.
- شریعت جعفری، محسن. ۱۳۷۵. زمین لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی). انتشارات سازه.
- عابدینی، م.، اسمعیلی نیری، ل.، پاسبان، ا.ح.، پیروزی، ا. ۱۴۰۲. بررسی و پهنه‌بندی خطر زمین لغزش در حوضه نیرچای با استفاده از مدل ANP، مطالعات علوم محیط زیست، ۸(۱): ۵۹۸۷-۶۰۰۲.
- عابدینی، م.، رنجبری، ا.، مختاری، د. ۱۳۹۸. تجزیه و تحلیل خطر زمین لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LR در محیط GIS (مطالعه موردی پهنه گسلی قوشاداغ- ارسباران در آذربایجان شرقی). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۸(۱): ۷۰-۸۸.
- عابدینی، موسی؛ قاسمیان، بهاره. ۱۳۹۴. پهنه بندی خطر زمین لغزش در شهرستان بیجار به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP). نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۹(۵۲): ۲۰۵-۲۲۷.
- قنبری، ح.، روستایی، ش. ۱۳۹۲. بررسی اولویت‌های برنامه‌ریزی و آمایش مناطق مرزی در استان آذربایجان شرقی با به‌کارگیری مدل تحلیل شبکه (ANP). آمایش سرزمین، ۵(۲): ۳۶۰-۳۳۵.
- کنعانی، س. ۱۴۰۲. شناسایی مناطق مستعد وقوع زمین لغزش در حوضه آبریز سد ایلام با استفاده از مدل تحلیل شبکه‌ای، جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۴): ۵۱۶-۵۲۴.
- کیانی، ش.، کریمخانی، ا.، مزیدی، ا. ۱۴۰۰. پهنه‌بندی خطر زمین لغزش با استفاده از رگرسیون لجستیک و آنفیس در حوضه آبریز هشتمین استان اردبیل، جغرافیا و پایداری محیط، ۱۱(۲): ۵۵-۷۳.
- مکانیکی، ج.، صادقی، ح. ۱۳۹۱. مکان‌یابی مراکز بهداشتی- درمانی (بیمارستان‌ها) شهر بیرجند، از طریق فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و مقایسه زوجی در محیط GIS. فصلنامه آمایش محیط، ۱۹: ۱۴۲-۱۲۱.
- یوسفی، ح.، یاراحمدی، ی. ۱۳۹۸. ارزیابی خطر زمین لغزش با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل شبکه (ANP) و منطق فازی (مطالعه موردی: حوضه صلوات‌آباد، سنندج). مجله اکوهیدرولوژی، ۶(۴): ۹۹۳-۱۰۰۲.
- Abedini, M., Ghasemyan, B., Ataollah Shirzadi, H., Shahabi, K.C., Binh Thai P., Baharin Bin, A., Dieu Tien. B., 2018. A Novel Hybrid Approach of Bayesian Logistic Regression and Its Ensembles for Landslide Susceptibility Assessment, Geocarto International, 34, <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1499820>.
- Abedini, M., Ghasemyan, B., Rezaei Mogaddam M. H., 2017. Landslide susceptibility mapping in Bijar city, Kurdistan Province, Iran: a comparative study by logistic regression and AHP models, Environmental Earth Science, 76: 308.
- Abedini, M., Tulabi, S., 2018. Assessing LNRF, FR, and AHP models in landslide susceptibility mapping index: a comparative study of Nojian watershed in Lorestan province, Iran, Environmental Earth Science, 77(405): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7524-1>.
- Addis, A. 2023. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Shannon Entropy Models in Dejen District, Northwestern Ethiopia, Journal of Engineering, <https://doi.org/10.1155/2023/1062388>.

- Aghdam, I. N., Pradhan, B., Panahi, M. 2017. Landslide susceptibility assessment using a novel hybrid model of statistical bivariate methods (FR and WOE) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) at southern Zagros Mountains in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 76(6): 237.
- Anbalagan, R., R. Kumar, K. Lakshmanan, S. Parida and S. Neethu. 2015. Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim. *Geoenvironmental Disasters* volume 2, Article number: 6: 1-17.
- Asmare, D. 2023. Application and validation of AHP and FR methods for landslide susceptibility mapping around choke mountain, northwestern Ethiopia, *Scientific African*, 19: 398-415.
- Broeckx, J., Vanmarcke, M., Duchateau, R. & Poesen, J. 2018. A data-based landslide susceptibility map of Africa. *Earth-Science Reviews*, 102-121.
- Chen, W., He, B., Zhang, L., Nover, D. 2016. Developing an integrated 2D and 3D WebGIS based platform for effective landslide hazard management , *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20:28-38.
- Gopinath, G., Jesiya, N., Achu, A.L., Bhadrans, A., Surendran, U.P. 2023. Ensemble of fuzzy-analytical hierarchy process in landslide susceptibility modeling from a humid tropical region of Western Ghats, Southern India, *Environmental Science and Pollution Research*, 81(13):1–18.
- Hamza, T., and T. K. Raghuvanshi. 2017. GIS based landslide hazard evaluation and zonation—A case from Jeldu District, Central Ethiopia. *Journal of King Saud University-Science*, 29(2): 151-165.
- Haque, U., Paula, F. D., Silva Graziella, Devoli., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wilopoi, W., Andersen, P., Luk, P., Lee, J., Yamamoto, T., Keellings, D. & Wuo, J. H., 2019. The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995-2014). *Science of The Total Environment*, 682: 673-684.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. 2008. *The landslide handbook: a guide to understanding landslides* (p. 129). Reston: US Geological Survey.
- Khullar, V.K., Sharam, R.P., and Paramanik, K., 2000. A GIS approach in the landside zone of lawngthlia in southern Mizoran, *Landslide: proceeding of the 8th international symposium on landslides*, 3:1461–1472.
- Liu, Jian Guo & Mason, Philippa J. 2009. *Essential image processing and GIS for remote sensing*. John Wiley & Sons. 443.
- Psomiadis, E., Papazachariou, A., Soulis, X. k., Alexiou, D., Charalampopoulos, I. 2020. Landslide Mapping and Susceptibility Assessment Using Geospatial Analysis and Earth Observation Data. *Land*, 9(5): 133; <https://doi.org/10.3390/land9050133>.
- Zhou, J., Tan, Sh., Li, J., Xu, J., Wang, Ch., Ye, H. Landslide Susceptibility Assessment Using the Analytic Hierarchy Process (AHP): A Case Study of a Construction Site for Photovoltaic Power Generation in Yunxian County, Southwest China, *Sustainability*, 15: 5281.